

破碎帯地すべり地の粘性土のリングせん断特性

矢田部龍一*・八木則男**・榎 明潔***

破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度特性をリングせん断試験により調べた。その結果、残留状態におけるせん断抵抗角 ϕ_r は $10^\circ \sim 30^\circ$ 程度であること、 ϕ_r と塑性指数 I_p あるいは粘土分含有量 CF との間に従来指摘されているような相関は認められないこと、また、 ϕ_r は粘土鉱物と粒度の影響を大きく受けることなどが明らかになった。

Keywords : landslide, clay, residual strength, ring shear

1. ま え が き

日本では多くの地すべりが発生しており、昔から防災対策上重要な問題となっている。近年、大規模な宅地造成や山岳部の道路工事などに伴う多くの地すべりが発生しており、地すべりの機構を解明することは一層切実な問題となっている。

地すべりのすべり面の強度定数は一般的には逆算法により求められている。しかし、地すべりの機構を解明するためには、すべり面（すべり層）の土の強度定数はせん断試験により求めることが望ましい。地すべりの安定を考える上でいわゆるピーク強度とともに残留強度の重要性が指摘されている。現に滑動している地すべりの多くは数 m から時には数百 m というような累積移動をしている。すべりは 1 m に満たないすべり層で起こっていることが多く、すべり層の土のひずみは破壊ひずみを越えている。このような大変形を受けた土の強度はピーク強度を越えて残留状態にある。土の残留強度に関しては、Skempton¹⁾ の先駆的研究に始まり、それ以後ロンドンクレー等を対象に多くの研究が行われてきている。日本では主に第三紀層地すべりのすべり層の粘性土を対象として研究がなされてきた。例えば宋ら²⁾、中村³⁾、宜保⁴⁾、古谷⁵⁾ の研究等があり、その特性もかなり明らかにされてきている。

ところで、小出⁶⁾ の提案による「破碎帯地すべり」の発生総件数は第三紀層地すべりに多い。しかし、破碎帯地すべりは地質構造が複雑であるが故に第三紀層地すべりと比べて土質力学的解明は遅れている。著者等は破碎帯地すべりのすべり層の粘性土のピーク強度に関

する特性を三軸試験により調べているが⁷⁾⁻¹⁰⁾、第三紀層地すべりのすべり層の粘性土のそれとは若干異なっていることを明らかにしている。したがって、残留強度特性に関しても破碎帯地すべりのすべり層の粘性土と第三紀層地すべりのすべり層の粘性土とは異なることが予想されるが、破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度に関してはほとんど調べられていないのが実状である。

本報告では四国の破碎帯地すべり地より採取したすべり層およびすべり層付近の粘性土の残留強度と残留強度に与えるせん断速度ならびに粒度の影響をリングせん断試験により調べた結果を述べる。また、各種粘土鉱物の残留強度についても述べる。

2. リングせん断試験機の概要と残留強度に与えるせん断速度の影響

(1) リングせん断試験機の概要

リングせん断試験機の概要を Fig.1 に示す。リングはアクリル製で、内径 10 cm、外径 16 cm、試料の高さは 2 cm であり、高さ 1 cm のところでせん断される。上載荷重は空圧シリンダーにより与えられ、せん断は下部のリングを回転させることにより行われる。せん断抵抗はロードセルにより、また、鉛直変位はダイヤルゲージにより測定される。下部リングにはすべり面より僅か下に位置するようにステンパイプ（注射針）がセットされるようになっており、水圧計を介してせん断時の発生間隙水圧を測定できる。排水は上下両面からなされる。

ところで、現在一般に多く用いられている Bishop¹¹⁾ により考案されたリングせん断試験機では小さなせん断抵抗を精度よく測定できるように上下のリングに僅かのギャップを設けることによりリング間の摩擦を除去している。本試験機ではギャップを設けていないのでリング間に摩擦がある。そこで、接触面にワセリンを塗布

* 正会員 工博 愛媛大学助手 工学部土木海洋工学科 (〒790 松山市文京町 3)

** 正会員 工博 愛媛大学教授 工学部土木海洋工学科

*** 正会員 工博 愛媛大学助教授 工学部土木海洋工学科

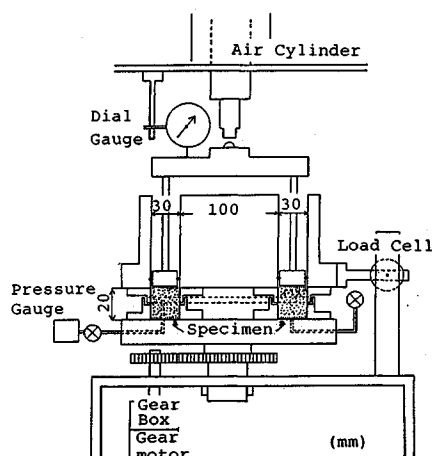


Fig.1 Ring shear apparatus.

することにより摩擦を軽減した。しかし、摩擦力はゼロとはならないので摩擦試験を行い、その測定結果を用いて補正した。摩擦力測定試験は5回行ったが、ロードセルで2.9 kgf~3.0 kgf (=×9.8 kN) 程度の摩擦による荷重が測定された。測定値からせん断強度を求める際には3.0 kgf (=×9.8 kN) を差し引いて計算した。

なお、リング径と試料高さは、従来の試験機を参考にして決めたものであるが、試料の厚さに関しては検討の余地がある。試料の厚さを薄くすれば排水距離が短くなり、排水試験ではそれだけせん断速度を大きくできる。

(2) リングせん断試験と三軸試験による土の強度定数の比較

試作したリングせん断試験機の妥当性を検討するため豊浦標準砂と陶土として使われている砥部粘土に対してリングせん断試験ならびに三軸圧縮試験を行い、ピーク強度に関する強度定数の比較を行った。豊浦標準砂の三軸試験は排水条件で、砥部粘土は圧密非排水条件で行った。豊浦砂の物性は $G_s=2.65$, $e_{max}=0.992$, $e_{min}=0.625$ であり、砥部粘土の物性は $G_s=2.68$, $LL=49\%$, $PL=27\%$ である。リングせん断試験のせん断速度は豊浦標準砂で $0.3552 (^{\circ}/min)$, 砥部粘土で $0.03552 (^{\circ}/min)$ で行った。この速度ではせん断時に間隙水圧の発生はほとんどみられない。また、三軸試験の変位速度は豊浦標準砂で $0.25 (mm/min)$, 砥部粘土で $0.0625 (mm/min)$ である。なお、圧密はリング容器の中で直接行い、リングの側面にはワセリンを塗って圧密時の摩擦を軽減している。

リングせん断試験では測定値からせん断強度を求める際の問題が残されており、計算法によって値が異なる。種々の計算法に関しては Bishop ら¹¹⁾ が詳細な検討を行っている。本研究では鉛直応力がリング状試料に均等分布するとしてせん断強度を求めている。

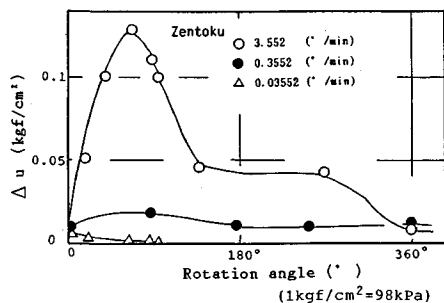


Fig.2 Changes of generated pore water pressure with time.

せん断試験の結果、間隙比 e が 0.79 の豊浦標準砂のせん断抵抗角 ϕ_d はリングせん断試験で 37.2° 、三軸試験で 38.0° であった。また、正規圧密状態の砥部粘土の場合、リングせん断試験による ϕ_d は 32.3° 、三軸試験による ϕ' は 33.2° であった。リングせん断試験と三軸圧縮試験によって得られる強度定数はほぼ同じであり、試作したリングせん断試験機は土のせん断試験機として妥当であると思われる。

(3) 残留強度に与えるせん断速度の影響

地すべりの安定解析を行う際に残留強度が用いられることは稀である。その理由の一つとして、排水状態におけるせん断強度を求めるためせん断試験に非常に長時間かかるということが挙げられる。ピーク強度は別にしても残留強度だけであれば、従来行われているよりも速いせん断速度の試験が可能であるように思われる。実際、極端に速い速度でなければ残留強度に与える影響は比較的小さいという報告もなされている^{12),13)}。そこで、本研究では、まず、破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度に与えるせん断速度の影響を調べ、一連の試験のせん断速度を定めた。

試料は徳島県の西祖谷山村の善徳地すべり地のすべり層の粘性土(三波川帯, 黒色片岩)と高知県大豊町の佐賀山地すべり地のすべり層の粘性土(御荷鉾帯, 緑色岩)それと高知県吾北村の打木地すべり地のすべり層の粘性土(秩父帯, 泥岩と緑色岩)を使用した。試料の物性ならびに粒度を Table 1 に示す。なお、佐賀山地すべりの緑色粘性土は Sagayama II と表記している。供試体はいずれも 420μ の篩を通過した細粒分を繰り返し正規圧密したものである。せん断速度は、3.552, 0.3552, 0.03552 ($^{\circ}/min$) の3種類を用いた。なお、一般に多く用いられているせん断速度は $0.03552 (^{\circ}/min)$ より若干小さい程度である。また、すべり層より採取した各試料は地すべり地名をつけて、以下善徳地すべり粘性土などと呼ぶことにする。

Fig.2 に各種せん断速度による試験時に発生した間隙水圧を示す。試料は善徳地すべり粘性土で、上載荷重は $2.0 \text{ kgf/cm}^2 (= \times 98 \text{ kPa})$ であり、間隙水圧はすべり

Table 1 Physical properties, gradation, parent rock and angle of shearing resistance.

No.	Soil sample	Sampling	Parent rock	Gradation(%)			W _L (%)	W _P (%)	I _p	G _s	φ (°)	φ _r (°)
				<2μm	2-20μm	20μm<						
1	Natori	B.C.	B.Sc.	3.0	83.2	23.8	48.6	38.9	9.7	2.84	22.8	12.1
2	Hitsukue	B.C.	G.Sc.	23.5	44.3	32.2	70.5	25.5	45.0	2.97	31.2	22.9
3	Honmura	B.C.	B.Sc.	23.4	32.9	43.7	57.5	28.5	29.0	2.91	29.5	23.5
4	Nozi	O.	B.Sc.	9.2	46.1	44.7	40.1	21.4	18.7	2.60	24.8	14.8
5	Kawadotsurebi	G.S.	B.Sc.	28.7	33.7	37.6	41.4	17.4	24.0	2.74	26.2	20.2
6	Zentoku	O.	B.Sc.	2.7	18.1	79.2	39.2	20.5	18.7	2.72	32.6	17.5
7	Morito	B.C.	G.Sc.	3.0	74.5	22.5	41.6	32.7	8.9	2.87	27.0	17.5
8	Sagayama I	O.	B.Sc.	7.6	19.6	72.8	32.4	14.1	18.3	2.79	25.2	21.1
9	Hirota I	B.C.	G.Sc.	6.8	87.9	5.3	31.2	17.7	13.5	2.65	21.1	15.3
	Hirota II	B.C.	G.Sc.	6.2	60.2	33.6	37.5	20.6	16.9	2.65	22.5	18.3
	Hirota III	B.C.	G.Sc.	6.2	29.9	60.9	28.9	15.8	13.7	2.65	24.2	23.7
	Hirota IV	B.C.	G.Sc.	12.2	25.5	62.3	24.3	12.7	11.5	2.62	28.7	23.7
	Hirota V	B.C.	G.Sc.	6.4	40.4	53.2	31.7	17.8	13.9	2.64	26.7	26.6
	Hirota VI	B.C.	G.Sc.	10.4	46.3	43.3	35.9	20.7	15.2	2.69	30.0	-
	Hirota VII	B.C.	G.Sc.	6.8	43.2	50.0	30.0	22.7	15.9	2.69	22.3	11.6
	Hirota VIII	O.	G.Sc.	23.3	58.2	18.5	52.0	31.1	20.9	2.96	22.6	10.2
10	Futami I	B.C.	G.Sc.	6.9	54.2	38.9	55.2	22.0	33.2	2.69	24.2	-
	Futami II	B.C.	G.Sc.	12.0	50.0	38.0	36.7	11.5	25.4	2.82	28.7	26.1
	Futami III	B.C.	G.Sc.	8.5	28.1	63.4	57.4	27.4	30.0	2.67	30.1	23.3
	Futami IV	B.C.	G.Sc.	11.1	44.5	44.4	44.3	21.4	22.9	2.67	33.4	26.2
	Futami V	B.C.	G.Sc.	21.4	36.9	41.7	32.4	19.2	13.2	2.90	23.8	22.6
	Futami VI	B.C.	G.Sc.	6.1	48.8	45.1	39.9	20.5	19.1	2.73	34.0	26.1
11	Futami VII	B.C.	G.Sc.	12.5	43.8	43.7	42.3	21.7	20.6	3.00	31.3	26.0
	Kuzuhara I	B.C.	B.Sc.	13.4	40.3	46.4	48.1	27.0	21.1	2.58	23.6	15.6
	Kuzuhara II	B.C.	B.Sc.	25.9	47.1	27.0	31.0	20.4	10.6	2.68	30.0	25.2
12	Oishi	B.C.	B.Sc.	10.0	63.0	27.0	43.7	22.0	21.7	2.65	19.3	11.9
13	Osako I	B.C.	B.Sc.	13.0	72.4	14.6	44.2	21.6	22.6	2.80	19.2	14.6
	Osako II	B.C.	B.Sc.	6.4	51.6	42.0	42.8	18.0	24.8	2.81	21.7	19.8
	Osako III	B.C.	B.Sc.	12.8	50.0	37.2	43.6	20.6	23.0	2.77	21.7	13.5
14	Mikawa I	B.C.	G.Sc.	9.4	73.5	17.1	33.6	17.7	15.8	2.85	26.1	21.6
	Mikawa II	B.C.	G.Sc.	6.5	44.5	49.0	54.0	22.9	31.1	2.86	26.7	24.2
	Mikawa III	B.C.	G.Sc.	15.4	34.8	50.8	39.0	20.3	18.7	2.88	26.1	22.7
	Mikawa IV	B.C.	G.Sc.	8.3	45.3	46.4	31.7	21.8	9.9	2.91	24.8	14.6
	Mikawa V	B.C.	G.Sc.	13.2	24.9	61.9	42.8	19.6	23.2	2.84	30.0	25.0
	Mikawa VI	B.C.	G.Sc.	12.2	26.7	61.1	67.6	28.0	39.6	3.01	26.1	-
	Mikawa VII	O.	G.St.	3.0	75.6	21.4	40.6	22.0	18.6	2.99	27.3	21.6
15	Sawatari I	B.C.	G.St.	12.8	34.4	52.8	44.0	24.2	19.8	2.79	28.3	25.3
	Sawatari II	B.C.	G.St.	7.5	54.7	37.8	47.2	19.3	27.9	2.83	21.7	19.4
	Sawatari III	B.C.	G.St.	9.3	72.6	18.1	55.8	22.4	33.4	2.80	20.5	14.4
	Sawatari IV	B.C.	G.St.	9.7	12.9	77.4	56.9	24.7	32.2	2.74	29.7	18.8
	Sawatari V	B.C.	G.St.	7.1	63.5	29.4	66.6	37.7	28.9	2.50	29.3	23.3
	Sawatari VI	B.C.	G.St.	10.8	59.5	29.7	51.1	27.5	23.6	2.82	27.4	19.4
	Sawatari VII	B.C.	G.St.	11.4	60.8	27.8	58.2	30.0	28.2	2.93	24.8	21.4
16	Isegawa I	B.C.	G.St.	26.1	37.7	36.2	42.6	20.8	21.8	2.98	26.1	18.4
	Isegawa II	B.C.	G.St.	12.7	55.7	31.6	37.0	26.7	10.3	2.83	30.0	23.2
	Isegawa III	B.C.	G.St.	17.4	45.4	37.2	43.4	20.3	23.2	2.59	23.0	16.1
	Isegawa IV	B.C.	G.St.	30.0	46.0	24.0	27.1	20.1	7.0	3.02	29.4	21.4
17	Nishiishihara1	B.C.	G.St.	25.9	37.0	37.1	45.2	21.1	24.1	2.98	21.7	12.4
	Nishiishihara2	B.C.	G.St.	14.5	51.8	33.7	45.8	21.9	23.9	2.45	25.5	15.7
	Aikawa I	B.C.	G.St.	14.6	37.0	48.4	54.7	31.1	23.6	2.75	21.9	14.2
18	Aikawa II	B.C.	G.St.	21.3	22.9	55.8	30.8	13.4	17.4	2.83	29.3	15.8
	Aikawa III	B.C.	G.St.	8.6	60.0	31.4	36.2	16.2	20.0	2.64	23.9	15.8
	Sagayama II	O.	G.St.	25.0	44.6	30.4	42.5	26.8	15.7	2.95	25.2	21.1
19	Nuta	B.C.	G.St.	26.9	34.2	38.9	33.5	16.7	16.8	3.02	28.4	18.5
20	Cyoja I	B.C.	Loam	12.0	14.9	73.1	34.2	13.9	20.3	2.79	30.0	29.4
	Cyoja II	B.C.	Sc.Sl.	11.4	18.1	70.5	60.5	24.7	35.8	2.68	34.9	31.5
21	Utsugi	G.S.	G.M.St.	7.5	22.5	70.0	26.3	14.7	11.6	2.80	26.7	20.1
22	Taninouchi	G.S.	H.St.	3.0	75.6	21.4	40.6	22.0	18.6	2.80	30.0	25.6

B.C.:Boring Core O.:Outcrop G.S.:Ground Surface

G.Sc.:Green Schist B.Sc.:Black Schist G.St.:Green Stone Se.Sl.:Serpentinized Slate H.St.:Mud Stone

面付近で測定している。これからせん断速度が速ければより大きな間隙水圧が発生すること、発生した間隙水圧は時間の経過とともに徐々に消散してほぼゼロになることなどがわかる。これは、大変位を与えることにより残留状態に近付けばせん断に伴う間隙水圧の発生がほぼゼロとなり、せん断初期に残留していた間隙水圧が消散していくからである。なお、図示はしていないが、鉛直変

位もせん断初期には大きいですが、大変位を与えることによりほぼ変化ゼロとなっている。

残留強度に与えるせん断速度の影響を Fig.3,4,5 に示す。試料は順に善徳地すべり粘性土、佐賀山地すべり粘性土、打木地すべり粘性土である。これからせん断速度の大きいものの方が若干強度が大きいような傾向がみられる。しかし、実用的には今回試験したせん断速度の違

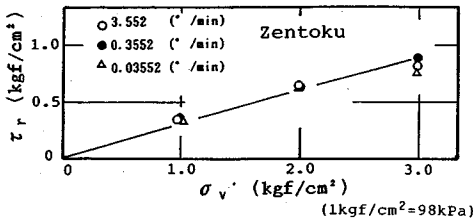


Fig.3 Influence of shear rate to residual strength.

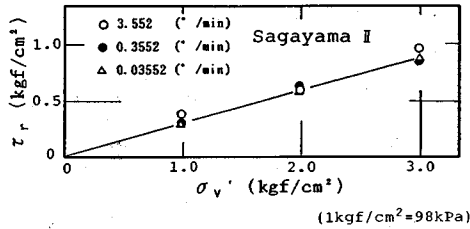


Fig.4 Influence of shear rate to residual strength.

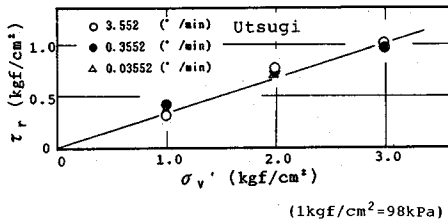


Fig.5 Influence of shear rate to residual strength.

いは、 $10^{-4} \sim 10^{-6}$ (cm/s) という比較的大きい透水係数を持つ破碎帯地すべり粘性土の残留強度にほとんど影響を与えないと考えてよい。したがって、以下の試験のせん断速度は総て 0.3552 (°/min) で行った。

前述したように、リングせん断試験は排水条件で行われることと大変形を与えるということのために一般的には非常に長時間かけて行われている。今回の結果から考えれば、ピーク強度は別にして残留強度だけ求めるのであれば今までよりかなり速い速度で行ってもよいと思われる。ただし、第三紀の泥岩では多量のスメクタイトを含み、透水係数が非常に小さい土もみられるが、これらに対しては別に検討する必要がある。

3. 破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度

(1) 試料, 実験方法

地すべりのすべり層の粘性土の残留強度は地すべり地ごとに異なると思われる。したがって、個別に試験により求めることが必要であるが、一般的な特性を把握しておくことも意義があることであると思われる。そこで、四国の各地の破碎帯地すべり地より採取したすべり層の粘性土の残留強度をリングせん断試験により調べた。

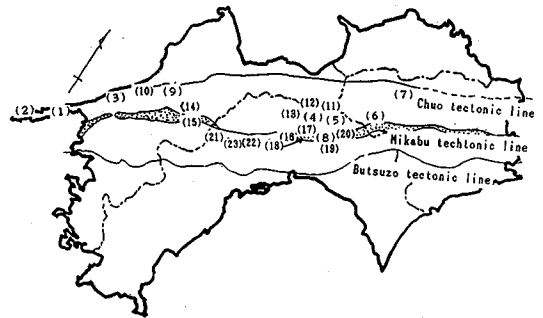


Fig.6 Location map.

用いた試料の採取地点を Fig.6 に、また試料の採取法、母岩、粒度、物性を Table 1 に示す。Table 1 の試料採取法の中で Out crop は、集水井の掘削時および崩落後の対策工施工の際の切土時に露出したすべり層から採取したものを意味しており、Ground surface は孔内傾斜計の観測結果などを基に想定されたすべり面が地すべり末端部を切る部分にみられた粘性土の露頭から採取したものを意味している。また、粒度試験は JIS A 1204 に基づいて行い、分散剤にはカ性ソーダを用いている。なお、秩父中・古生層は堆積岩として扱われており、破碎帯地すべりと呼ぶのに無理があるかも知れない。しかし、地すべりが多く発生している秩父北帯では片理が発達しているので破碎帯地すべりとして扱った。試料は 420 μ の篩を通して、繰り返し再圧密したものである。

上載荷重は 0.5, 1.0, 1.5, 2.0 kgf/cm² (= $\times 9.8$ kPa) とし、多段階荷重試験を行っている。圧密は正規圧密とし、圧密時間は 1 日である。なお、過圧密試料に対する一連の試験は行っていないが、残留状態におけるせん断抵抗角は初期の応力履歴の影響を殆ど受けないことを確かめている。また、宋ら²⁾の研究でも同様な結論が得られている。

せん断速度がピークに達した後、強度低下して残留値になるまでの変位は試料によって異なる。今回行った試験では殆どの試料がリングが一回転するまでにはほぼ定常値に達していたので、残留強度の値としてはリングが一回転から二回転の変位を与えた時の値としている。せん断速度は 0.3552 (°/min) で行った。

ピーク強度は圧密非排水三軸圧縮試験により求めた。供試体は繰り返し再圧密試料を用いた。圧密は等方圧密で、圧密圧力は 2.0, 3.0, 4.0 kgf/cm² (= $\times 98$ kPa), 圧密時間は 1 日とした。また、変位速度は 0.0625 (mm/min) で行った。

なお、四国の地質は瀬戸内側から太平洋側に向かって順に領家帯、三波川帯、御荷鉾帯、秩父帯、四万十帯となっているが、大半の地すべりは三波川帯で発生しており、次いで御荷鉾帯、秩父帯でもかなりの数の地すべり

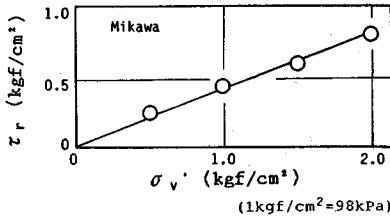


Fig.7 Residual strength line.

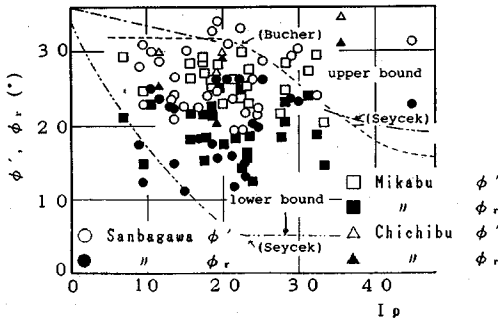


Fig.8 Relationship between residual strength and plasticity index.

が発生している。片理の発達した領家帯の和泉層群でも切土による地すべりなどが発生しているが、領家帯の花崗岩地帯、四万十帯ではいわゆる地すべりは殆ど発生していない。

(2) 実験結果と考察

残留強度線の一例を Fig.7 に示す。残留強度線は拘束圧の影響を受けるということが従来指摘されている^{14), 15)}。そして、残留状態における粘着力 c_r の取り扱いにより破壊包絡線を曲線とするか実用的に c_r を含む直線の強度線で考えるべきか議論されてきている。本試験結果をみると拘束圧の影響を受けているものもあるが、原点を通る直線で示しても大きな誤差はないと思われる。そこで、本報告では残留強度を摩擦成分のみに起因しているとして残留強度線を原点を通る直線で考える。但し、実際の設計では実験値があれば土被り圧に応じた強度定数を用いた方がよいと思われる。

従来、残留強度を支配する因子の把握や残留強度を簡単に推定することを目的として残留強度と塑性指数 I_p および粘土分 ($<2\mu$) 含有量 CF の関係が調べられており、相関があることが指摘されている。そこで、破碎帯地すべりのすべり層の粘性土でも残留強度と I_p や CF との間に相関が認められるか否かを調べた。

Fig.8 に三軸試験により得た有効応力基準によるせん断抵抗角 ϕ ならびにリングせん断試験による残留状態でのせん断抵抗角 ϕ_r と I_p の関係を、Fig.9 に ϕ_r と CF の関係を示す。図中には Skempton¹³⁾ が PI/CF=0.5~0.9 の試料に対して示した ϕ_r と CF の関係ならびに

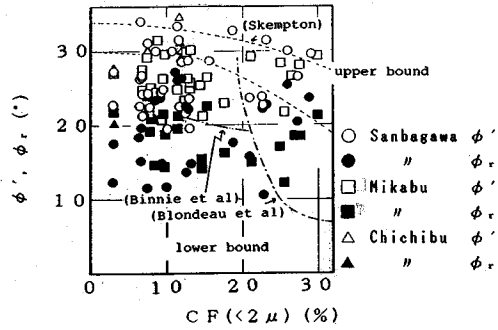


Fig.9 Relationship between residual strength and clay fraction.

Lupini ら¹⁶⁾ が従来の研究をまとめて示した ϕ_r と CF および I_p の関係の下限と上限を併記してある。また、各試料の強度定数について Table 1 に示す。なお、 c' はいずれの試料もゼロであった。

分離面の形成は粒子の配向の程度を示す目安として重要なものと言われている。分離面が形成されるとすべり面が鏡肌状を呈し、試験終了時にすべり面を境にして試料が上下に簡単に分離できる。本実験で分離面が形成されたものは、名取、広田、双海、能地、葛原、大砂子、川戸連火、善徳、森遠、佐賀山 II、大石、美川、沢渡、怒田、打木の各試料である。なお、宜保ら¹⁵⁾ は分離面に対する X 線回折結果から粒子の配向の程度を明らかにし、残留強度と粒子の配向の程度を定量的に示している。

これらの試験結果から次のようなことがわかる。

① 今回調べた破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の ϕ は $20^\circ \sim 35^\circ$ 程度で、日本の海成粘土のそれと比べて若干小さい。また、 ϕ_r は $10^\circ \sim 31^\circ$ 程度であり、 ϕ と比べて $5^\circ \sim 15^\circ$ 程度小さい。このように破碎帯地すべりのすべり面の粘性土も大変形状態ではかなりの強度低下を示すので、地すべりの安定性を検討する際に残留強度特性も調べておくことが必要である。なお、 ϕ 、 ϕ_r とともに地質帯による大きな違いはみられない。

② Fig.8,9 に併記したように、従来の研究では板状粘土鉱物に関して ϕ_r が I_p および CF の増加とともに低下するという傾向があることが指摘されていたが、破碎帯地すべりのすべり層の粘性土に関してはそのような傾向はみられない。

ϕ_r と I_p の関係をみると Lupini らが示した上限値と下限値の間に大部分が入っているが、 ϕ_r と CF との関係では Lupini らが従来の試験結果をまとめて示した ϕ_r の存在範囲の下限値 (Blondeau らおよび Binnie らによる) を大きく下回っている。また、Skempton¹³⁾ によれば CF が 20% 以下では強度の低下は余り見られないということであるが、本実験結果をみる限りでは当てはまらない、CF が 10% 以下の試料でも 10° 以上もせん

Table 2 Physical properties and gradation.

Clay mineral	Gradation (%)			W _L (%)	W _p (%)	I _p	G _s	φ'	φ _r
	(<2μm)	(2~20μm)	(20μm<)						
Vermiculite	0	0	100	--	--	--	2.89	24.2	9.8
Mica	13.0	39.5	47.5	70.5	25.5	45.0	3.03	36.9	11.8
Illite	12.3	66.5	21.2	60.9	26.6	34.3	2.79	28.8	15.9
Chlorite	7.5	3.5	89.0	28.2	18.3	9.9	2.80	23.6	17.5
Kaolinite	35.0	63.0	2.0	41.3	20.2	21.1	2.71	32.3	25.6

断抵抗角が低下しているものもある。

③ 分離面が形成される試料の方が形成されない試料と比べてφ_rからφ_r'への低下の度合いが激しいようである。したがって、破碎帯地すべりのすべり層の粘性土でも粒子の配向は残留強度の機構を考える上で重要な要因の一つである。

以上示したように、破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度特性の内、φ_r'とI_pおよびCFとの関係に関しては従来の研究により明らかにされたものとは若干異なるようである。

従来の研究をみるとスメクタイトを含む試料に関する試験が多い。日本でもスメクタイトが主要粘土鉱物の一つである第三紀層の泥岩の風化した粘性土あるいはすべり層の粘性土に関する試験が多く行われており、それらの試験ではφ_r'とI_pの間に良い相関があることが指摘されている^{17)~19)}。これはスメクタイトが他の粘土鉱物と比べて非常に大きな塑性指数を示し、また、せん断抵抗角が小さいという性質を持っているので塑性指数をパラメーターとした場合、比較的良い相関を示しやすいからである。

破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度を考える上で特徴の一つは、スメクタイトが支配的粘土鉱物ではないということである。破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度特性を考える場合、スメクタイト以外の粘土鉱物の残留強度特性を明らかにする必要がある。

4. 各種粘土鉱物の残留強度

破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の粘土鉱物としては御荷鉾緑色岩の主要粘土鉱物であるクロライトを始めとしてイライト、パーミキュライト、雲母、カオリナイト、スメクタイトなどがある⁹⁾。これらの内、スメクタイトの含有量は比較的少なく、その残留強度特性も調べられている。そこで、スメクタイト以外の粘土鉱物の残留強度をリングせん断試験により調べた。

(1) 試料, 実験方法

使用した試料はクロライト、イライト、パーミキュライト、雲母、カオリナイトである。物性ならびに粒度をTable 2に示す。これらの内、クロライト、パーミキュライト、雲母はボールミルで5日間粉碎し、420μの篩を通して使用した。使用した岩は粘土鉱物の純度の高いものである。なお、粉碎した試料と風化して粘土化した試料

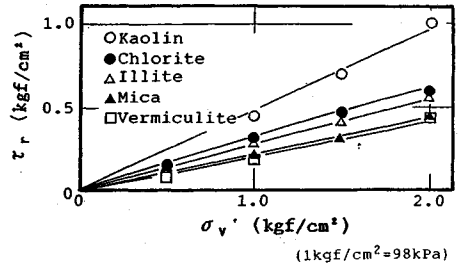


Fig.10 Residual strength lines.

とは粘土鉱物が同じでも力学特性が異なることが予想される。しかし、風化して粘土化した粘土鉱物よりなる純度の高い試料の入手は困難であるので今回は粉碎した試料を一部使用した。なお、パーミキュライトは粉碎が十分でなかったせいか粘土分が殆どなく、液性限界と塑性限界を求めることができなかった。実験方法は前述の通りである。

(2) 実験結果と考察

各粘土鉱物の残留強度線をFig.10に示す。φ_r'が最も小さいのはパーミキュライトで9.8°、次いで、雲母が11.8°、イライトが15.9°、クロライトが17.5°で、カオリナイトは25.6°である。

破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の主要構成粘土鉱物のφ_r'は10°~25°とかなりの広範囲にわたっている。しかし、Table 1に示した破碎帯地すべりのすべり層の粘性土のφ_r'の存在範囲と今回試験した粘土鉱物のφ_r'の存在範囲はほぼ等しい。また、今回試験した破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の中で10°強という小さなφ_r'を示したのは絹雲母緑色片岩の風化した広田粘性土VI、VIIと黒色片岩の風化した名取粘性土それと大石粘性土である。これらの試料のうち広田粘性土VI、VIIと名取粘性土に関してはX線回折により多くの雲母を含むことを確かめており、φ_r'が比較的小さいのは雲母の特性が現れているからであると思われる。

残留強度の機構としては、せん断に伴い粒子がせん断面方向へ再配向して、粒子が面々接触することにより強度低下が起こるという説明がなされている。したがって、残留強度に影響する要因としては、粘土粒子の表面電荷、粒子の大きさと形状、接触面の摩擦角といった粘土鉱物に関する要因と吸着イオンに関する要因などがある。本実験結果を見る限りでは破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度には粘土鉱物の影響も大きいのではないと思われる。

粘土鉱物個々のφ_r'とCFの関係をみるとカオリナイト以外はLupiniが示した下限値を大きく外れている。特に、今回試験したパーミキュライトは粒度的には砂分のみでI_pも求めることができないにも拘らず、φ_r'が24.2°であるのに対してφ_r'は9.8°と大きく低下してい

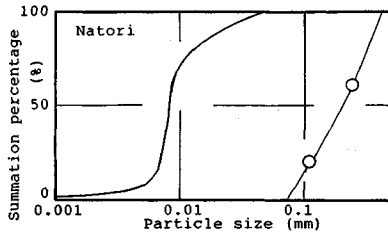


Fig.11 Grain size distribution curve.

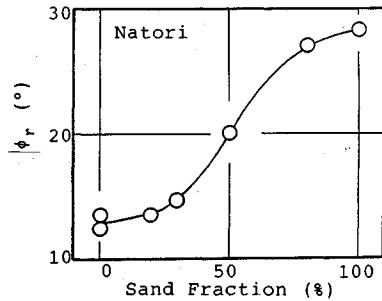


Fig.12 Relationship between angle of residual strength and sand content.

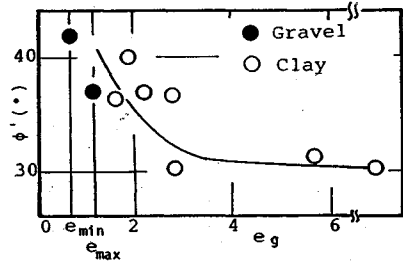


Fig.13 Relationship between angle of shear resistance and void ratio of gravel fraction.

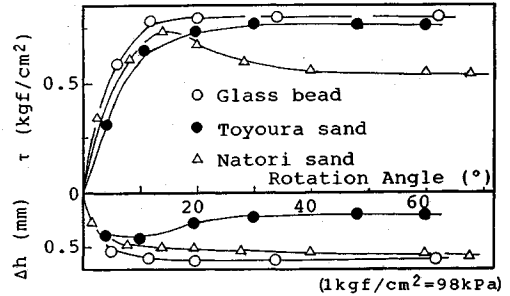


Fig.14 Relationship between shear stress, rotational angle and volume change.

る。今回試験した粘土鉱物はいずれも板状粘土鉱物である。Skempton が試験した範囲における板状粘土鉱物に対して提示した ϕ_r と CF の関係は今回試験したクロライト、イライト、パーミキュライト、雲母に関しては成り立たない。

5. 残留強度に与える粒度の影響

Fig.8,9 に示したように破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の ϕ_r は $10^\circ \sim 30^\circ$ 程度であることが明らかになった。しかし、この結果は 420μ 篩を通過した試料に対しての結果である。

破碎帯地すべりのすべり面の粘性土は砂と礫の含有量が比較的多い。リングせん断試験を行う場合、試験機の大きさの制約により粗粒分を除いて試験することが多い。したがって、実際のすべり層の試料の残留強度を推定するためには、残留強度に与える粒度の影響を調べておく必要がある。

粒度としては、粘土分含有量が重要である。これは、残留強度が粘土粒子の配向に支配されているからである。そこで、粘土、シルト、砂分を種々に配合して、粘土分含有量の異なる試料を作成してリングせん断試験を行い、残留強度に与える粒度の影響を調べた。

(1) 試料, 実験方法

試料は愛媛県の佐田岬半島の名取地すべり地より採取した黒色片岩の風化した粘性土を用いた。試料は 420μ の篩を通したものを、更に 74μ の篩を通して砂分とシルト分以下に分離し、人工的に種々の割合に混合し

た。Fig.11 に粒径加積曲線を示す。シルト分の物性は $G_s=2.84$, $LL=48.6\%$, $PL=38.9\%$ である。

(2) 実験結果と考察

Fig.12 に ϕ_r と砂分含有率の関係を示す。砂分含有率が小さいうちは残留強度への影響は小さく、20% では0%と比べて摩擦角が約 1° 、30% では 2° 増えている程度である。30% を越えると急に砂の影響が大きくなるようで、50% では 8° も増えている。そして、砂分含有率が80%になると砂のみの残留強度とほぼ等しくなっている。このように残留強度には粒度が大きく影響することがわかる。砂分含有量が増えたことによる残留強度の増加は粘土粒子の配向が不十分になっていくこと、砂粒同士の接触面積が増えることなどによると思われる。なお、Skempton¹³⁾ はCFが20%以下では強度低下はほとんど起こらないと指摘しているが、CFをシルト分以下の含有率に置き換えれば本実験も同様の結果を示していることになる。

Fig.13 は陶土として使われている砥部粘土 ($LL=49.6\%$, $PL=25.6\%$, $G_s=2.68$) に種々の割合で礫(粒径: $2.39 \text{ mm} \sim 4.76 \text{ mm}$, $G_s=2.65$) を混入させて作成した供試体に対する圧密非排水三軸試験より求めた内部摩擦角 ϕ' と礫間隙比 e_g (=粘土分と水の体積/礫実質部分の体積) の関係である。実験方法と結果の詳細は参考文献²⁰⁾ に示すが、 ϕ' も礫が30%程度を越えると急に礫の影響が現れるようである。

以上示したように、砂分含有率が小さい内は残留強度

への影響はないが、ある程度含有率が大きくなると（本実験では30%程度）残留強度は大きくなる。したがって、砂分を含んだ土の残留強度を調べる場合、粒度の影響を考慮する必要がある。

Fig.14に名取粘性土の砂分だけを試料として用い、初期間隙比 $e_0=0.81$ 、初期有効上載圧 $\sigma_v=1.0\text{ kgf/cm}^2$ （ $=98\text{ kPa}$ ）で行ったリングせん断試験より得たせん断強度と体積変化ならびに回転角度の関係を示す。これで特徴的なことは、体積変化は圧縮側であるにも拘らず、せん断強度は一旦ピークになった後、強度低下していることである。ピークにおける内部摩擦角は約 36.5° であるが、大変位を与えることにより 28° 以下にまで低下する。この強度低下は粘土の残留強度のメカニズムとは若干異なると思われる。粘土粒子の場合、表面の電荷が関係しているのに対し、砂では粒子同士の摩擦力の変化だけである。

大変形を与えることによる砂の摩擦力の変化の要因としては、粒子の配向や粒子表面の破碎が考えられる。粒子の配向は扁平な粒子で起こりやすく、また、粒子表面の破碎は粒子そのものが軟らかく、表面の凹凸の激しいものほど起こりやすいと思われる。そこで、粒子の形状が円く、粒子表面が比較的滑らかで、破碎が起こりにくいガラスビーズ（粒度 $0.3\sim 0.425\text{ mm}$ ）と豊浦標準砂を用いてリングせん断試験を行った。初期間隙比はガラスビーズで 0.84 、豊浦標準砂で 0.79 である。試験結果はFig.14に併記してある。ガラスビーズと豊浦標準砂では大変位を与えてもせん断強度は低下しない。これから、粒子の形状が残留強度特性に影響しているのではないと思われる。

6. あとがき

破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度特性と残留強度特性に与えるせん断速度および粒度の影響ならびに粘土鉱物の残留強度特性をリングせん断試験により調べた。得られた結論を以下に示す。

1) 今回行ったせん断速度の範囲では破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の残留強度に大きな違いは認められなかった。したがって、残留強度だけを求めるのであれば、一般に行われているよりかなり速い速度でリングせん断試験を行うことができる。

2) 今回試験した破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の ϕ_r は $10^\circ\sim 31^\circ$ であり、三軸試験で求めた ϕ' と比べて $5^\circ\sim 15^\circ$ 程度小さい。したがって、破碎帯地すべりの安定解析に当たっても残留強度特性を検討する必要があると思われる。

3) 破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の ϕ_r はCFおよび I_p との間に従来指摘されているような相関は認められない。特に、CFとの関係においては従来示され

ている下限値を大きく下回る。

4) 主要な構成粘土鉱物の ϕ_r は、パーミキュライトと雲母のそれが 10° 前後と小さく、イライト、クロライトの順に大きくなり、カオリンでは 25° 程度である。これら粘土鉱物の ϕ_r の存在範囲と破碎帯地すべりのすべり層の粘性土の ϕ_r のそれとはほぼ等しい。

5) 残留強度に与える砂分含有量の影響は大きく、砂分含有率が30%を越えるようになると急に残留強度は大きくなり、80%では砂だけの残留強度とほぼ等しくなるようである。

本研究を行うにあたり琉球大学農学部 宜保清一教授には有意義なご討議をしていただいた。用いた試料の採取に際しては、四国地建大洲工事事務所、同吉野川砂防工事事務所、愛媛県松山地方局土地改良課、同林業課、同久万土木事務所、愛媛県八幡浜地方局土地改良課、高知県土木部砂防課、同越知土木事務所、同伊野土木事務所、徳島県土木部砂防課、同池田土木事務所、アースコンサルタント、四国公業ボーリング、東建地質調査松山支店、内場地下工業松山営業所、相愛、国土防災技術松山支店にお世話になった。また、リングせん断試験機の製作は愛媛大学工学部附属機械実習工場で行い、試験機の設計は愛媛大学工学部技官 二神治氏による。実験は当時愛媛大学大学院 石井朋紀氏（現松山市役所）ならびに同工学部海洋工学科 松田久和氏（現（株）住化土建設計）に協力戴いた。関係諸機関、諸氏に感謝いたします。

参 考 文 献

- 1) Skempton, A.W. : Long-term stability of clay slopes, *Geotechnique*, Vol.14, No.2, pp.77~102, 1964.
- 2) 宋 栄規・岡田富士夫：乱された粘土の残留強度に及ぼす影響要因，土質工学会論文報告集，Vol.8, No.4, pp.107~118, 1978.
- 3) 中村浩之：地すべりとすべり面の残留強度，土木技術資料，21-8, pp.14~19, 1979.
- 4) 宜保清一：粘土の残留強度決定に関する研究，琉球大学農学部学術報告，第26巻，pp.183~272, 1979.
- 5) 古谷 保：奈良尾地すべり地区の第三紀層泥岩及び粘土のせん断強度と安定解析による強度定数の検討，農土試技報，第22号，pp.41~52, 1981.
- 6) 小出 博：日本の地すべり—その予知と対策—，東洋経済新報社，pp.34~37, 1955.
- 7) Yagi, N., Enoki, M. and Yatabe, R. : Consideration on mechanical characteristics of landslide clay, *Proc. of the 5th International Symposium on Landslides*, Vol.1, pp.361~364, 1988.
- 8) 榎 明潔・八木則男・矢田部龍一：地すべり粘土の強度定数について，土質工学会四国支部 & 地すべり学会関西支部，斜面崩壊および地すべりの予知と対策に関するシンポジウム発表論文集，pp.209~216, 1988.
- 9) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔：破碎帯地すべり粘土

- の力学特性, 土木学会論文集, 第406号, pp.43-51, 1989.
- 10) 矢田部龍一・八木則男・榎 明潔: 乱さない地すべり粘土のせん断特性, 地すべり, Vol.26, No.4, pp.3-9, 1990.
 - 11) Bishop, A.W., Green, G.E., Garga, V.K. Andresen, A. and Brown, J.D. : A new ring shear apparatus and its application to the measurement of residual strength, *Geotechnique*, Vol.21, No.4, pp.273-328, 1971.
 - 12) Kenny, T.C. : The influence of mineral composition on the residual strength of natural soils, *Proc. Geotechnical Conf., Oslo*, Vol.1, pp.123-129, 1967.
 - 13) Skempton, A.W. : Residual strength of clays in landslides, folded strata and the laboratory, *Geotechnique*, Vol.35, No.1, pp.3-18, 1985.
 - 14) Skempton, A.W., and Petley, D.J. : The strength along structural discontinuities in stiff clays, *Proc. Geotechnical Conf., Oslo*, Vol.2, pp.29-46, 1967.
 - 15) Gibo, S., Egashira, K. and Ohtsubo, M. : Residual strength of smectite-dominated soils from the Kamenose land slide in Japan, *Canadian Geotechnical Journal*, Vol.24, No.3, pp.456-462, 1987.
 - 16) Lupini, J.F., Skinner, A.E. and Vaughan, P.R. : The drained residual strength of cohesive soils, *Geotechnique*, Vol.31, No.2, pp.181-213, 1981.
 - 17) 玉田文吾: 地すべり面のせん断強度常数と粘土鉱物の関係, 地すべり, Vol.20, No.4, pp.7-13, 1984.
 - 18) 濱崎英作, 守随治雄, 白石一夫: 地すべり粘土の残留強度とX線分析結果(スメクタイト含有量)の比較, 第26回地すべり学会研究発表講演集, pp.54-57, 1987.
 - 19) 宜保清一: すべり面付近泥岩の残留強さ-残留せん断抵抗角 ϕ_r と塑性指数 I_p との関係, 第24回土質工学研究発表会発表講演集, pp.595-596, 1989.
 - 20) 八木則男・榎 明潔, 丸山 悟: 不連続粒度を有する土のせん断特性, 第41回土木学会中国四国支部研究発表会講演概要集, pp.268-269, 1989. (1990.9.12受付)

RING SHEAR CHARACTERISTICS OF CLAYS IN FRACTURED-ZONE-LANDSLIDE

Ryuichi YATABE, Norio YAGI and Meiketsu ENOKI

The residual strength characteristics of a fractured zone landslide clays were examined by ring shear tests. The influence of shearing rate to residual strength was investigated. The residual friction angles ϕ_r of fifty eight clays of the fractured zone landslides were approximately $10^\circ \sim 30^\circ$. The residual friction angle was smaller than that of peak shearing resistance ϕ' by an amount of $1^\circ \sim 15^\circ$. The correlations between residual friction angles and soil index properties and gradings were not recognized. The ring shear characteristics of clay minerals of the fractured landslide clay, vermiculite, mica, illite, chlorite and kaolinite, were investigated. These residual friction angles were about $10^\circ \sim 25^\circ$. The influence of particle size distribution to residual friction angle was investigated.